



## Einführung in die Astronomie



# AZM

Teil 1 – Geschichte der Astronomie und Entwicklung unserer Vorstellung von unserer Stellung im Universum

- Die Wurzeln der Astronomie
- Unser Platz im Kosmos
- Moderne Astronomie und Raumfahrt

Teil 2 – Das Sonnensystem

- Entstehung von Planetensystemen
- Aufbau unseres Sonnensystems
- Die Planeten und ihre Monde
- Der Erdmond
- Leben auf anderen Planeten

Teil 3 – Aufbau und Entwicklung der Sterne

- Zustandsgrößen der Sterne
- Entwicklung der Sterne

Teil 4 – Galaxien und Kosmologie

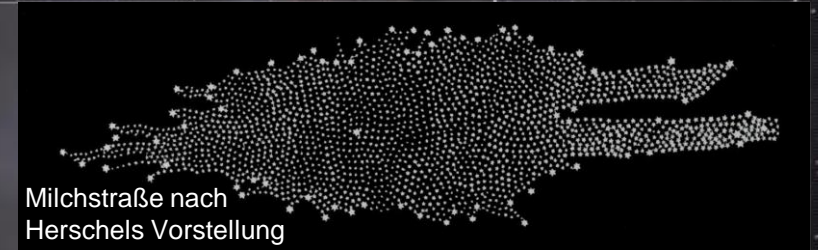
- Unsere Milchstraße
- Morphologie und Klassen von Galaxien
- Entwicklung des Universums

## Teil 4 – Galaxien und kosmische Zusammenhänge

- Unsere Milchstraße
  - Entwicklung unserer Vorstellung von unserer Milchstraße
  - Ein Blick in die Forschung
  - Was unsere Milchstraße ist und woraus sie besteht
  - Materie-Recycling
- Morphologie und Klassen von Galaxien
  - Klassifikation nach Hubble
  - Merger
- Die Entwicklung des Universums
  - Entfernung der Galaxien – Standardkerzen und die Hubble-Konstante
  - Galaxienhaufen und Materieverteilung
  - Urknall und Expansion des Universums

## Meilensteine der Erforschung

- G. Galilei (1564-1642) – Milchstraße besteht aus Myriaden Sternen
- I. Kant (1724-1804) – vermutete Nebelflecke sind eigenständige Milchstraßen
- Ch. Messier (1730-1771) – erste gelistete Nebelobjekte
- F. W. Herschel (1738-1822) – umfangreiche Kataloge, Grundlage für NGC-Katalog, Sternzählungen
- W. Parsons, Earl of Rosse (1800-1867) – erste Spiralstrukturen an M51 erkannt
- J. L. E. Dreyer (1852-1926) – NGC und IC-Kataloge
- H. S. Leavitt (1868-1921) – Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von  $\delta$ -Cepheiden (1912)
- V. Slipher (1875-1969) – Entdeckung der Rotverschiebung von Galaxien (um 1915)
- A. Einstein (1879-1955) – Allgemeine Relativitätstheorie (1915)
- H. Shapley (1885-1972) u. H. D. Curtis (1872-1942) – Great Debate (1920)  
Größe der Milchstraße (Shapley), extragalaktische Nebel (Curtis)
- E. P. Hubble (1889-1953) – Entfernungsbestimmung von M31, Klassifizierung von Galaxien, Korrelation der Rotverschiebung mit Entfernung (1927)
- G. Lemaitre (1894-1966) – Postulierung der Expansion des Universums (1927)
- A. Penzias, R. W. Wilson – Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung (1964)
- HST u. WMAP – Hubble-Ultra-Deep-Field und genauere Bestimmung der Hubble-Konstante ( $\sim 63$  km/s/Mpc)
- JWST – Suche nach den ersten Galaxien

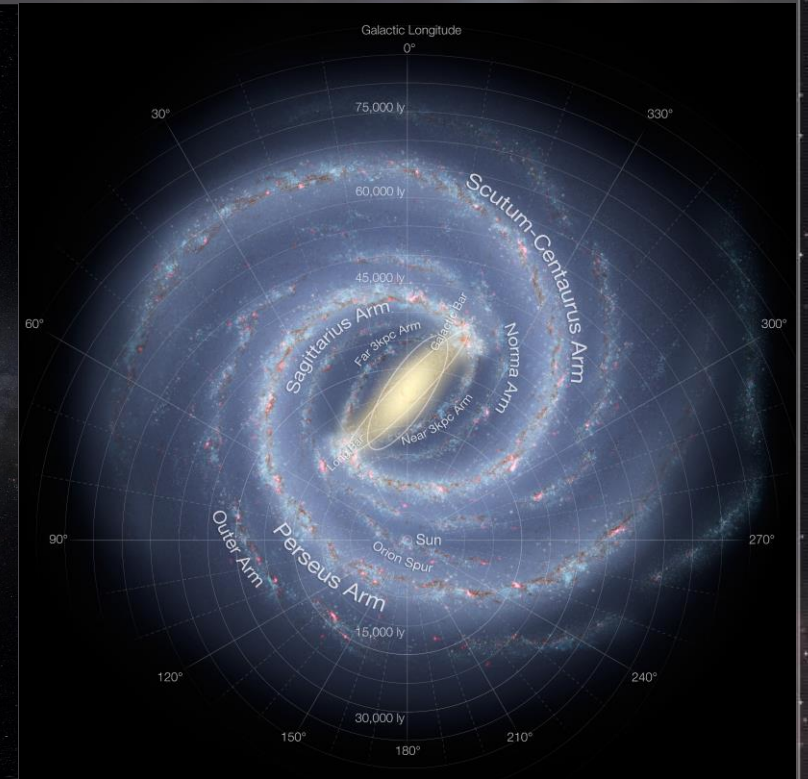


## Was unsere Milchstraße ist

- Eine 200.000 Lichtjahre durchmessende, gravitativ gebundene Ansammlung von Sternen, Planetensystemen, Gas- und Staubwolken.
- Hat eine scheibenförmige Spiralstruktur mit einem sphäroiden Kernbereich und einem Halo aus Kugelsternhaufen und heißem Gas.
- Hat eine Gesamtmasse von etwa 1,5 Billionen Sonnenmassen (inkl. Dunkler Materie) und besteht aus etwa 250 Milliarden Sternen.



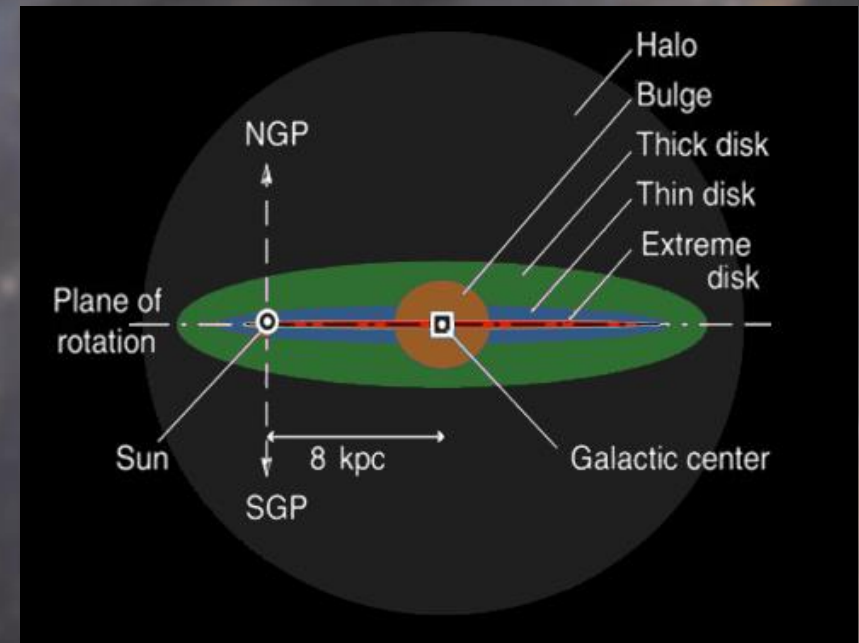
Milchstraßenpanorama aus den Daten der Gaia-Mission



Milchstraße (theoretischer Anblick)

Der Aufbau der Milchstraße ist in mehrere Komponenten gegliedert und folgt einer zeitlichen Entwicklung

- **Scheibe** mit spiralförmiger Struktur. Sie wird in drei Komponenten gegliedert.
  - Junge dünne Scheibe mit einer Höhe von wenigen hundert Lichtjahren enthält das meiste Gas und Staub und ist somit das Gebiet der gegenwärtigen Sternentstehung.
  - Alte dünne Scheibe erstreckt sich bis etwa 1.500 Lichtjahre über- und unterhalb der Milchstraßenebene
  - Dicke Scheibe erreicht etwa 120.000 Lj im Durchmesser bei 5.000 Lichtjahre Höhe und enthält kaum Gas oder Staub, ist sehr dünn bevölkert. Sonne ist Teil davon.
- **Bulge** ist die zentrale Verdickung, die bei der Milchstraße balkenförmig (ovoid) ausgeprägt ist. Seine Maße sind ca. 11.000 x 4.000 Lichtjahre. Der Bulge weist eine hohe Dichte und starke Leuchtkraft auf.
- Der **Halo** besteht aus Kugelsternhaufen, Feldsternen und Gas. Sphärisch verteilte alte und etwas flacher verteilte jüngere Kugelsternhaufen verteilen sich etwa 100.000 Lj um das Zentrum, der Halo aus Feldsternen reicht darüber hinaus.
- „Dunkle“ Komponente wird aus der Bewegung der Sterne und des Gases postuliert.



Schematischer Aufbau der Milchstraße

Die Milchstraße wird von verschiedenen Sternpopulationen bevölkert

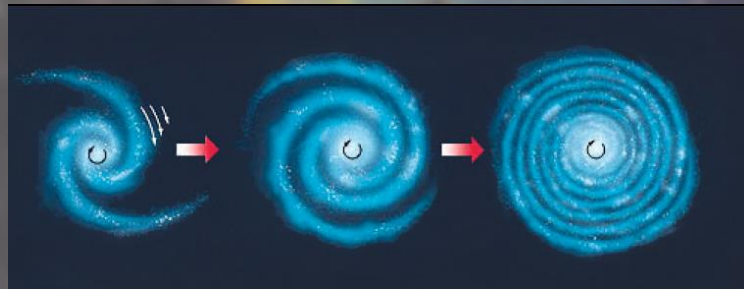
- Population I – Sterne sind junge, metallreiche Sterne und sind Hauptbestandteil der (dünnen) Scheibe. Sie sind aber auch im Bulge zu finden. Sie weisen die geringsten Pekuliargeschwindigkeiten auf.
- Population II – Sterne sind metallarme ältere Sterne aus der Frühgeschichte der Milchstraße und hauptsächlich im zentralen Bulge vorhanden, sind aber auch Teil der (dicken) Scheibe.
- Halosterne können aus dem zentralen Bulge als auch der Scheibenpopulation entstammen. Sie können aber auch – meist als Teil von Sternströmen – Reste eingefangener Zwerggalaxien sein. Sie weisen meist eine sehr hohe Geschwindigkeit auf.



Bewegung der Sterne in der Milchstraße

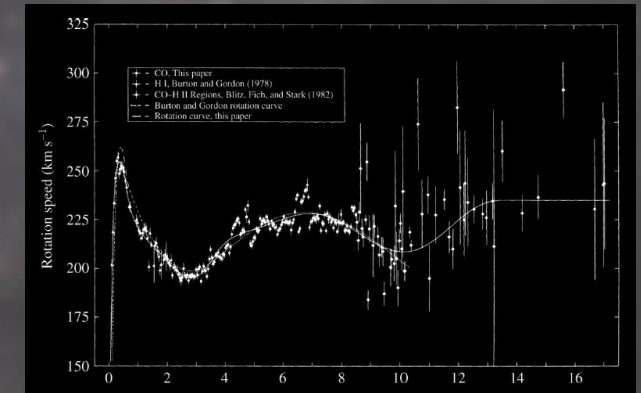
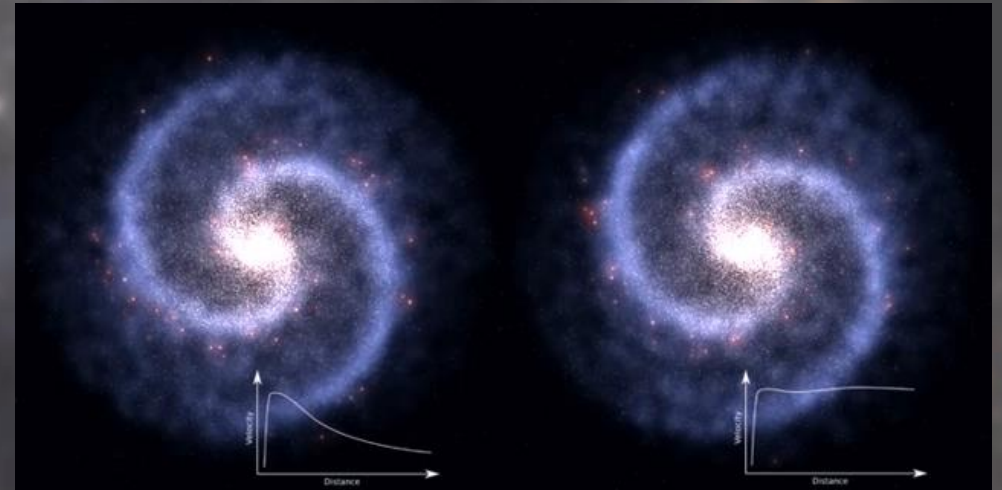
## Der Spiralstruktur der Milchstraße

- Ist nicht durch differentielle Rotation zu erklären.
  - Galaktisches Jahr (Dauer eines Sonnenumlaufs um das Zentrum) dauert ca. 230 Mio. Jahre
  - Milchstraße ist ca. 12-13 Mrd. Jahre alt, entspricht etwa 50 Gal. Jahre
  - Spiralstruktur hätte sich dadurch längst „aufgewickelt“
- Dichtewellen-Theorie
  - Spiralarme sind starr rotierende Dichtewellen (erhöhtes Gravitationspotential)
  - Rotationsdauer ca. halbe Umlaufgeschwindigkeit der Sterne
  - Sterne und Gas durchlaufen die Dichtewellen
  - Gas-/Staub-Wolken werden beim Durchgang komprimiert, Sternentstehung wird angeregt
  - Junge Sternhaufen und HII-Regionen markieren die Spiralstruktur



Computersimulation einer differentiell rotierenden Spirale

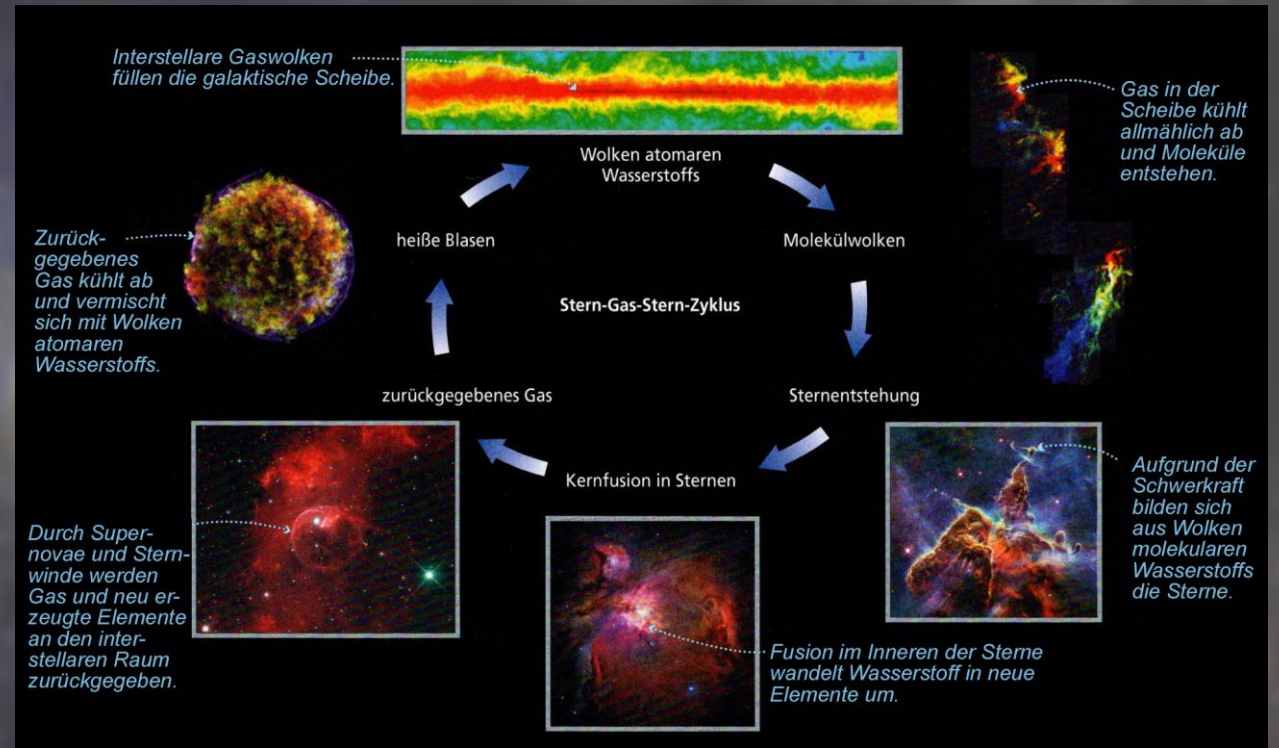
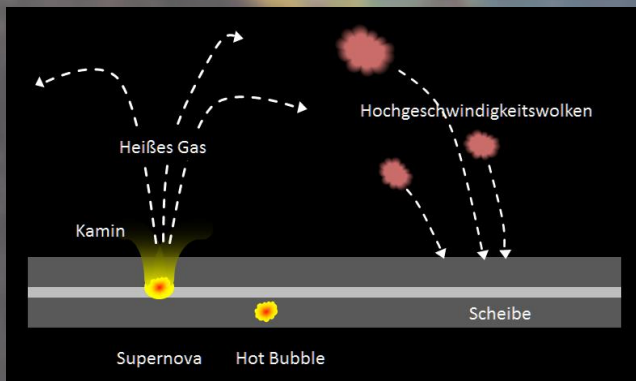
Simulation stehender Dichtewellen  
Rotationsprofile ohne bzw. mit CDM



Rotationskurve der Milchstraße

## Der galaktische Materiekreislauf

- In der initialen Nukleosynthese im frühen Universum entstanden nur Wasserstoff und Helium (Massenanteile 75% H, 25% He).
- Sterne entstehen aus dichten, kalten, molekularen Gaswolken, das idR nur in den Scheiben von Spiralgalaxien vorkommt.
- Schwerere Elemente werden ausschließlich in Sternen erbrütet. Noch schwerere Elemente (ab Fe, Ni) nur bei SN-Explosionen.
- Dieses Material wird von den Sternen durch Sternwinde und an deren Ende durch Abstoßen der äußeren Hüllen oder bei SN-Expl. an das interstellare Medium wieder zurück gegeben.
- Heißes Gas aus SN-Expl. können in den galaktischen Halo entweichen, dort abkühlen und auf die Scheibe zurück regnen.
- Seit des fast 14 Mrd. Jahre andauernden Recycling-Prozesses erreichte der Anteil an schweren Elementen ~ 2 % Massenanteil gegenüber ca. 71% H und 27% He.



Gas-Stern-Gas-Zyklus

# Galaxien – Unsere Milchstraße

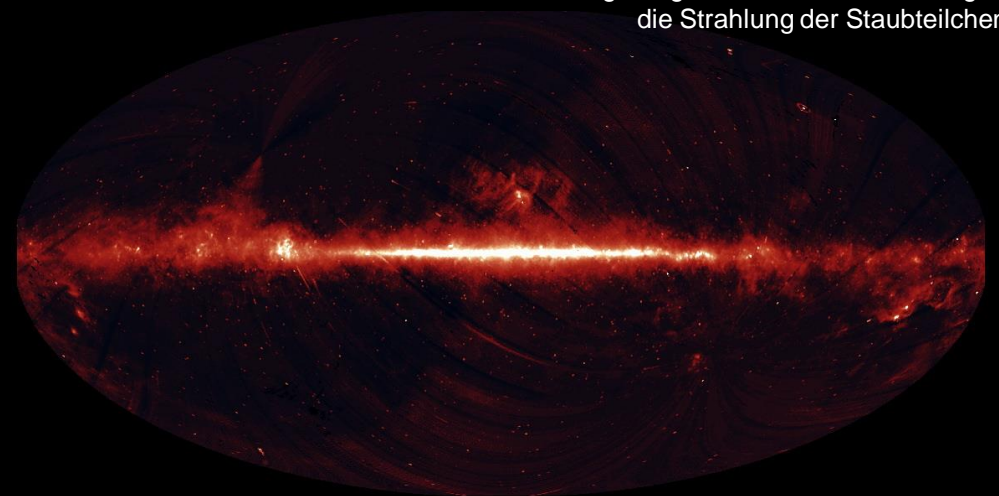
Optischer Bereich

Staubwolken blockieren den größten Teil des Sternenlichts im sichtbaren Licht



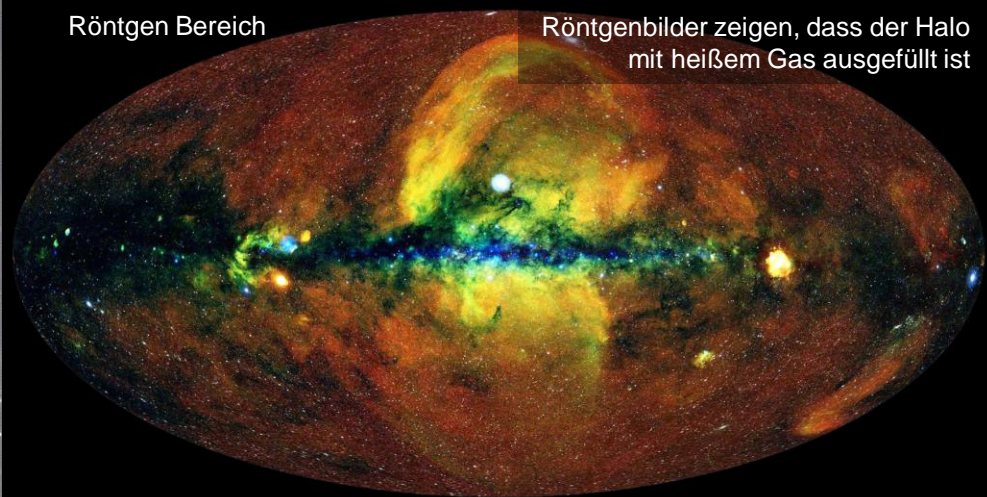
Infrarot Bereich

Langwellige Infrarotaufnahmen zeigen die Strahlung der Staubteilchen



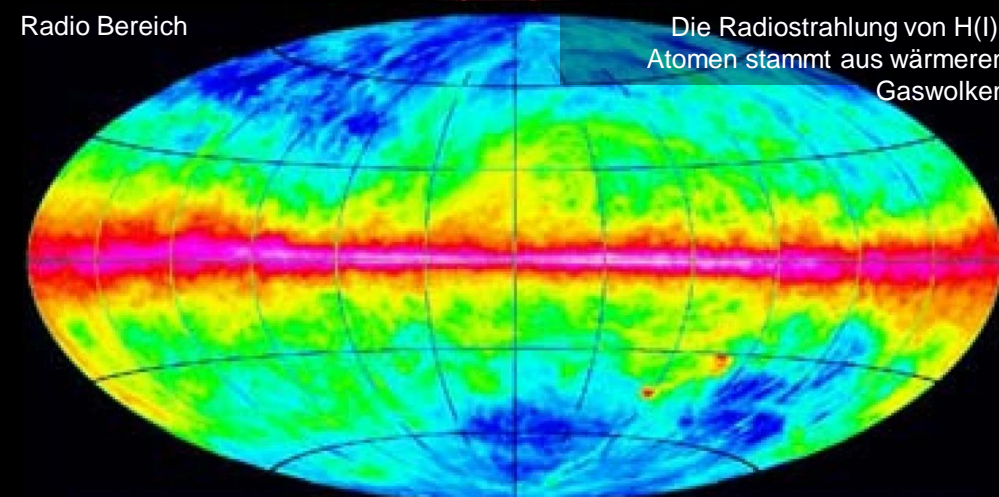
Röntgen Bereich

Röntgenbilder zeigen, dass der Halo mit heißem Gas ausgefüllt ist

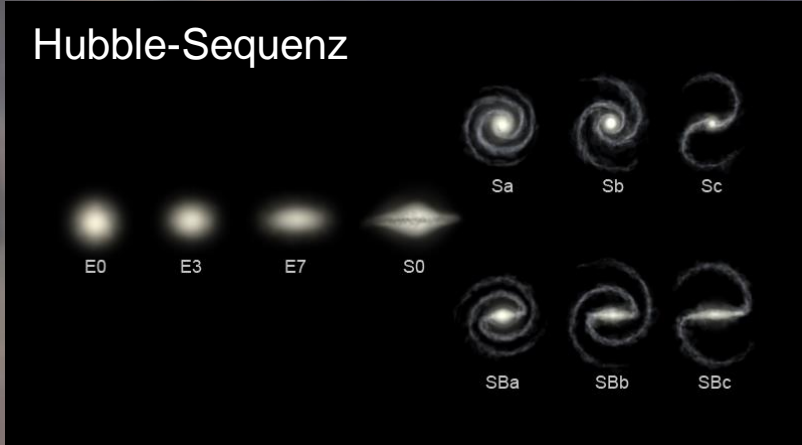


Radio Bereich

Die Radiostrahlung von H(I)-Atomen stammt aus wärmeren Gaswolken



## Hubble-Sequenz



Elliptische Galaxie vom Typ E6



Galaxie vom Typ SO (M102)



Spiralgalaxie (M 101, Sab)



Balkenspirale (NGC 1300, SBb)



Unregelmäßige Galaxie (M82, Irr)

## Elliptische Galaxien

- Strukturlose, linsenförmige sphäroidale Ansammlungen von alten Sternen
- Keine Scheibenkomponente
- Enthalten kaum Staub oder kaltes Gas, daher keine neue Sternentstehung
- Enthalten vor allem alte, metallarme Sterne (rötl. Farbe)
- Finden sich vor allem in großen Galaxienhaufen mit ca. 50% Anteil (außerhalb von Galaxienhaufen nur ~15%)
- Weites Massenspektrum – von Zwerggalaxien mit wenigen Mio. Sonnenmassen bis zu zentralen Riesengalaxien (cDs) in Galaxienhaufen mit bis zu 10 Billionen Sonnenmassen
- Letztere entstanden vermutlich aus der Verschmelzung größerer Galaxien bzw. durch Akkumulierung mehrerer kleinerer Galaxien
- cD-Galaxien beziehen ihre Bezeichnung durch den ausgedehnten diffusen Halo und weisen oft mehrere Kerne und eine starke Radiostrahlung auf.



Elliptische Galaxie (NGC 1132, E6)

## Zwerggalaxien

- Höchster Anteil an Galaxien (10x mehr als große Galaxien), meist irregulär mit geringer Oberflächenhelligkeit, selten Spiralen
- Oft hoher Staub- und Gasanteil mit aktiver Sternentstehung
- elliptische Zwerggalaxien sind vorwiegend in Galaxienhaufen zu finden
- In Milchstraßenumgebung werden aber zu wenige Zwerggalaxien beobachtet (nach kosmologischem Modell sollten es um die 1000 sein, jedoch bislang nur rund 100 gefunden)
- Haben hohe Bedeutung für die Entwicklung der großen Galaxien (galaktischer Kanibalismus), waren im frühen Universum vermutlich die Keimzellen der heutigen großen Galaxien
- Dzt. werden noch primordiale Zwerggalaxien gesucht (Metallizität als Indikator, JWST)



Irreguläre Zwerg-Galaxie NGC 6822 im Sagittarius

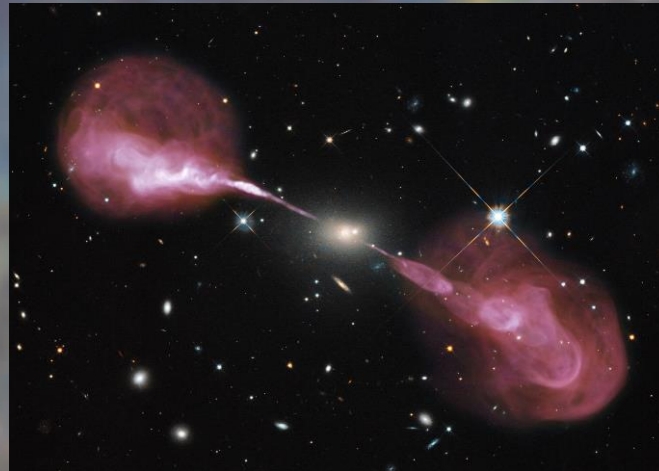
### Aktive Galaxien (AGN's)

AGN's sind im allgemeinen Galaxien mit aktivem Kern, das heißt, solchen, die in einem oder mehreren Spektralbereichen eine ungewöhnlich hohe Strahlung emittieren. Sie können meist über sehr große Entfernungen angemessen werden.

- Radio-Galaxien – Aktive Galaxie mit ausgeprägter Synchrotron-Strahlung im Radiobereich aus der Wechselwirkung zwischen Materie-Jets und ISM, meist ellipt. Riesengalaxien.
- Seyfert-Galaxien – weisen charakteristische Spektrallinien auf. Sie haben einen hellen Kern und emittieren in weiten Spektralbereichen (Radio- bis Röntgenstrahlung). Ursache dafür vermutlich Materieeinströme in ein zentrales Schwarzes Loch.
- BL-Lac-Objekte – ähnlich QSO's, weisen eine nicht periodisch veränderliche Leuchtkraft über ihr gesamtes Spektrum auf.
- Quasare (QSO's) – ähnlich Seyfert-Galaxien, aber mit wesentlich hellerem Kern, der die restliche Galaxie überstrahlt und wegen der idR immensen Entfernung wie ein Stern erscheint.



Seyfertgalaxie NGC 7742



Radiogalaxie Herkules A (kombinierte Aufnahme HST/Spitzer)

### Wechselwirkende Galaxien

- Galaxien unterliegen Gezeitenkräften.
- Große Galaxien entstanden durch Verschmelzung zweier oder mehrerer kleiner Galaxien und der Einverleibung weiterer kleiner Galaxien.
- Prozess startete mit Beginn der Galaxienbildung im frühen Universum und dauert bis heute an. Verschmelzungsrate sank mit steigender Expansion.
- Lässt sich auch heute noch vielfach beobachten, vor allem innerhalb dichter Galaxienhaufen.
- Gezeitenkräfte bewirken meist erhöhte Sternbildungsrate
- Auch in der lokalen Gruppe zu beobachten (Milchstraße - Andromeda-G.)
- Ringgalaxien und Polarring-Galaxien sind Sonderformen.



Cartwheel-Galaxie (eine Ringgalaxie)



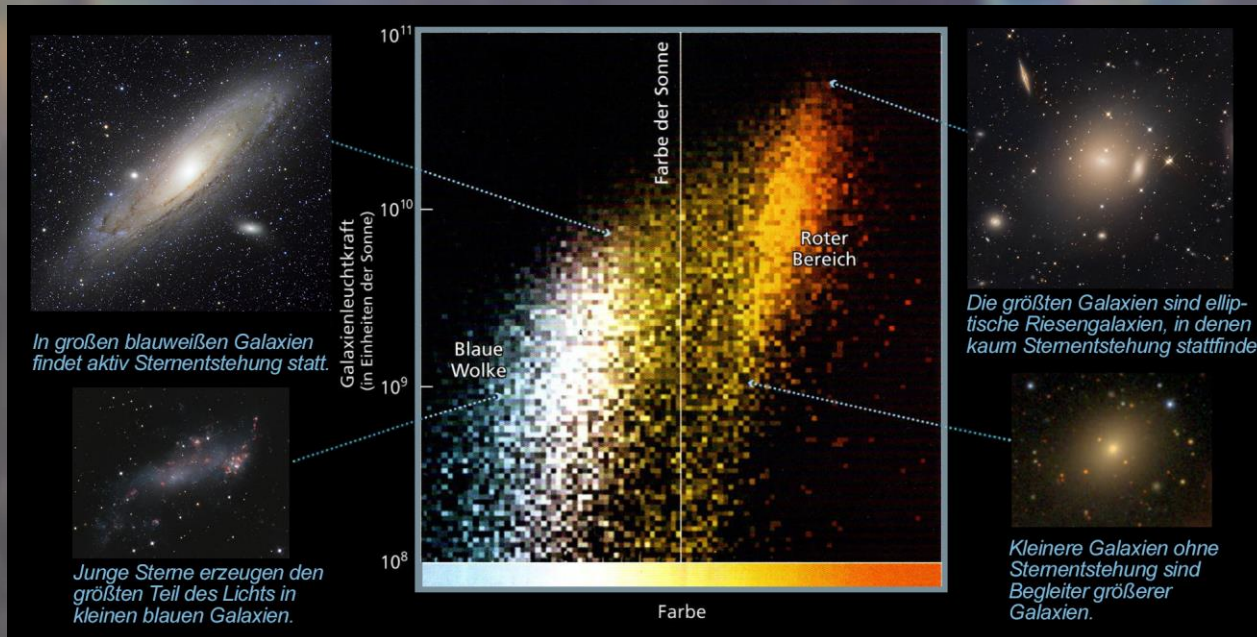
NGC 4696 mit ausgeprägten Staubfilamenten



Wechselwirkende Galaxien NGC 4038 und 4039 im Sternbild Becher

## Farbe-Leuchtkraft-Diagramm

- In einem Diagramm ähnlich dem HRD lassen sich zwei Hauptgruppen von Galaxien unterscheiden: Rote Gruppe – Farbe wird von Sternen mit geringer Metallizität dominiert, und Blaue Gruppe – Galaxien mit aktiver Sternentstehung. Junge blaue Sterne dominieren.
- Zeigt Entwicklungstrend von Galaxien. Elliptische Galaxien bestehen fast nur noch aus alten Sternen, müssen aber in ihrer Frühzeit ebenfalls junge Sterne enthalten haben.
- Galaxien beginnen als Mitglieder der blauen Gruppe und wandern dann in den roten Bereich, sobald ihr Gas aufgebraucht, oder sonstwie verloren ging.

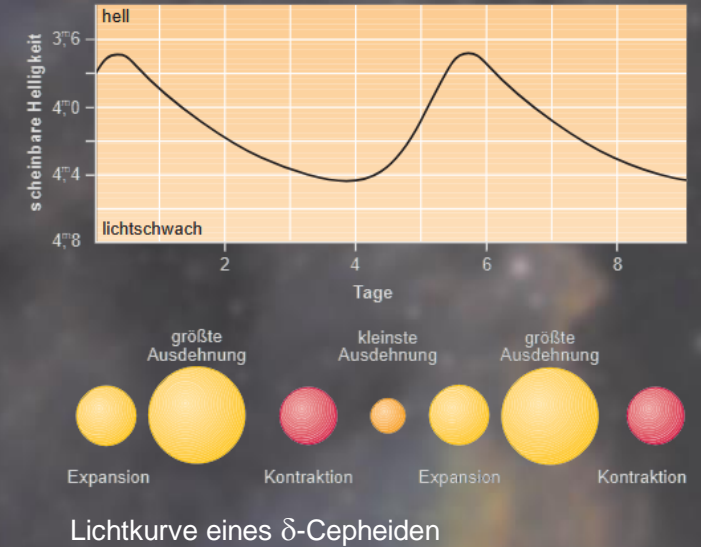


Farbe-Leuchtkraftdiagramm von Galaxien zeigen zwei Hauptgruppen

## Entfernungsbestimmung von Galaxien mit „Standardkerzen“

Trigonometrische und Photometrische Methoden erlauben die Eichung von Standardkerzen, mit deren Hilfe immer größere Entfernungen ermittelt werden können.

- Delta-Cepheiden ( $\delta$  Cep) – Für diese bestimmte Klasse regelmäßig veränderlicher Sterne ist eine genaue Beziehung zwischen der Pulsationslänge und der absoluten Helligkeit bekannt.



## Entfernungsbestimmung von Galaxien mit „Standardkerzen“

Trigonometrische und Photometrische Methoden erlauben die Eichung von Standardkerzen, mit deren Hilfe immer größere Entfernungen ermittelt werden können.

- Delta-Cepheiden ( $\delta$  Cep) – Für diese bestimmte Klasse regelmäßig veränderlicher Sterne ist eine genaue Beziehung zwischen der Pulsationslänge und der absoluten Helligkeit bekannt.
- Super Novae Typ Ia – Ist das Ende eines Weißen Zwergs in einem kataklysmischen Doppelsternsystem. Durch das Absaugen von Materie des Partnersterns erreicht der Weiße Zwerg die Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen und implodiert aufgrund der überhand nehmenden Schwerkraft. Die definierte Masse garantiert einen Helligkeitsanstieg mit bekannter maximaler absoluter Helligkeit.

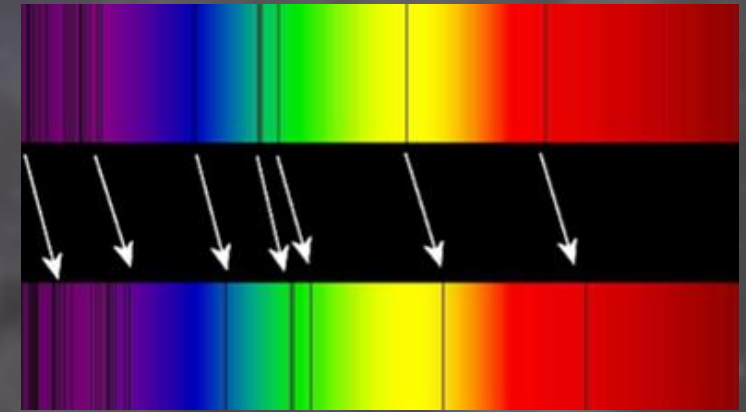


Supernova vom Typ Ia in der Galaxie NGC 891

## Entfernungsbestimmung von Galaxien mit „Standardkerzen“

Trigonometrische und Photometrische Methoden erlauben die Eichung von Standardkerzen, mit deren Hilfe immer größere Entfernungen ermittelt werden können.

- Delta-Cepheiden ( $\delta$  Cep) – Für diese bestimmte Klasse regelmäßig veränderlicher Sterne ist eine genaue Beziehung zwischen der Pulsationslänge und der absoluten Helligkeit bekannt.
- Super Novae Typ Ia – Ist das Ende eines Weißen Zwerge in einem kataklysmischen Doppelsternsystem. Durch das Absaugen von Materie des Partnersterns erreicht der Weiße Zwerg die Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen und implodiert aufgrund der überhand nehmenden Schwerkraft. Die definierte Masse garantiert einen Helligkeitsanstieg mit bekannter maximaler absoluter Helligkeit.
- Tully-Fisher-Beziehung – beschreibt den Zusammenhang von Rotationsgeschwindigkeit und Leuchtkraft einer Spiralgalaxie. Beide Größen sind abhängig von der Masse.
- Rotverschiebung – Aufgrund der Expansion des Universums werden Lichtwellen umso mehr gedehnt, je weiter die Lichtquelle von uns entfernt ist. Die Distanz weit entfernter Lichtquellen werden auch als z-Wert gemessen. z ist dabei die Differenz der Linienverschiebung zur Ruhewellenlänge. Der Zuwachs an Geschwindigkeit pro Mpc Distanz wird als Hubblekonstante definiert. Derzeit gilt ein Wert von 63 (+/- 2) km/s/Mpc. Der Kehrwert der Hubblekonstante ergibt das Weltalter.
- BAO's – Großskalige Strukturen im Universum aufgrund winziger Dichtefluktuationen im frühen Universum erscheinen in größeren Distanzen bzw. zu früheren Zeitpunkten linear kleiner.



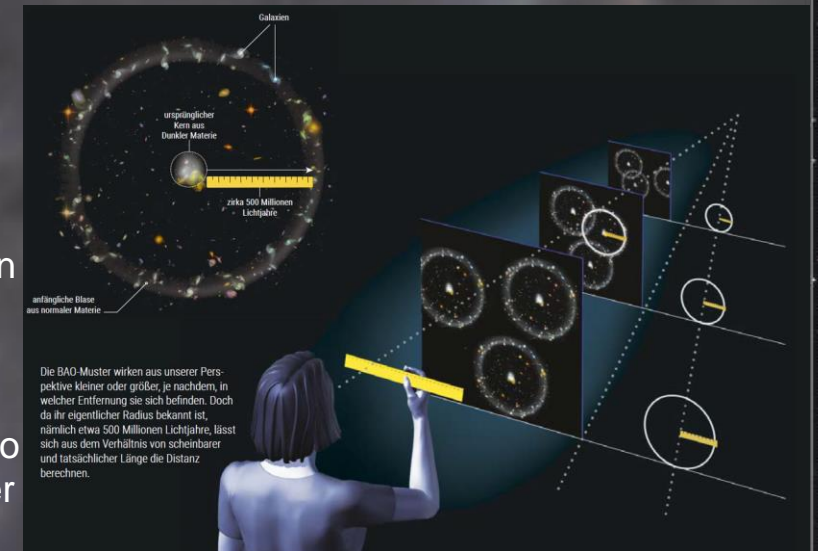
Edwin P. Hubble

Edwin P. Hubble entschied 1923 mit der Entdeckung der Rotverschiebung und dem Nachweis von Delta-Cepheiden in der Andromedagalaxis die sogen. „great debate“ zwischen H. D. Curtis und H. Shapley, ob Galaxien eigenständige Sternsysteme weit außerhalb unserer Milchstraße sind.

## Entfernungsbestimmung von Galaxien mit „Standardkerzen“

Trigonometrische und Photometrische Methoden erlauben die Eichung von Standardkerzen, mit deren Hilfe immer größere Entfernungen ermittelt werden können.

- Delta-Cepheiden ( $\delta$  Cep) – Für diese bestimmte Klasse regelmäßig veränderlicher Sterne ist eine genaue Beziehung zwischen der Pulsationslänge und der absoluten Helligkeit bekannt.
- Super Novae Typ Ia – Ist das Ende eines Weißen Zwergs in einem kataklysmischen Doppelsternsystem. Durch das Absaugen von Materie des Partnersterns erreicht der Weiße Zwerg die Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen und implodiert aufgrund der überhand nehmenden Schwerkraft. Die definierte Masse garantiert einen Helligkeitsanstieg mit bekannter maximaler absoluter Helligkeit.
- Tully-Fisher-Beziehung – beschreibt den Zusammenhang von Rotationsgeschwindigkeit und Leuchtkraft einer Spiralgalaxie. Beide Größen sind abhängig von der Masse.
- Rotverschiebung – Aufgrund der Expansion des Universums werden Lichtwellen umso mehr gedehnt, je weiter die Lichtquelle von uns entfernt ist. Die Distanz weit entfernter Lichtquellen werden auch als z-Wert gemessen. z ist dabei die Differenz der Linienverschiebung zur Ruhewellenlänge. Der Zuwachs an Geschwindigkeit pro Mpc Distanz wird als Hubblekonstante definiert. Derzeit gilt ein Wert von 63 (+/- 2) km/s/Mpc. Der Kehrwert der Hubblekonstante ergibt das Weltalter.
- BAO's – Großskalige Strukturen im Universum aufgrund winziger Dichtefluktuationen im frühen Universum erscheinen in größeren Distanzen bzw. zu früheren Zeitpunkten linear kleiner.

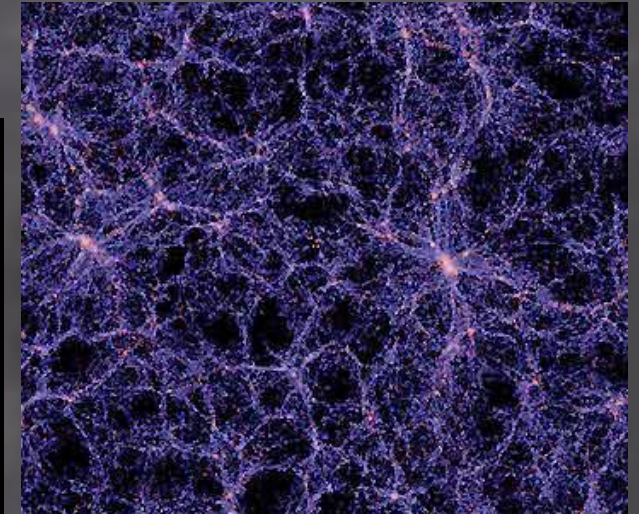
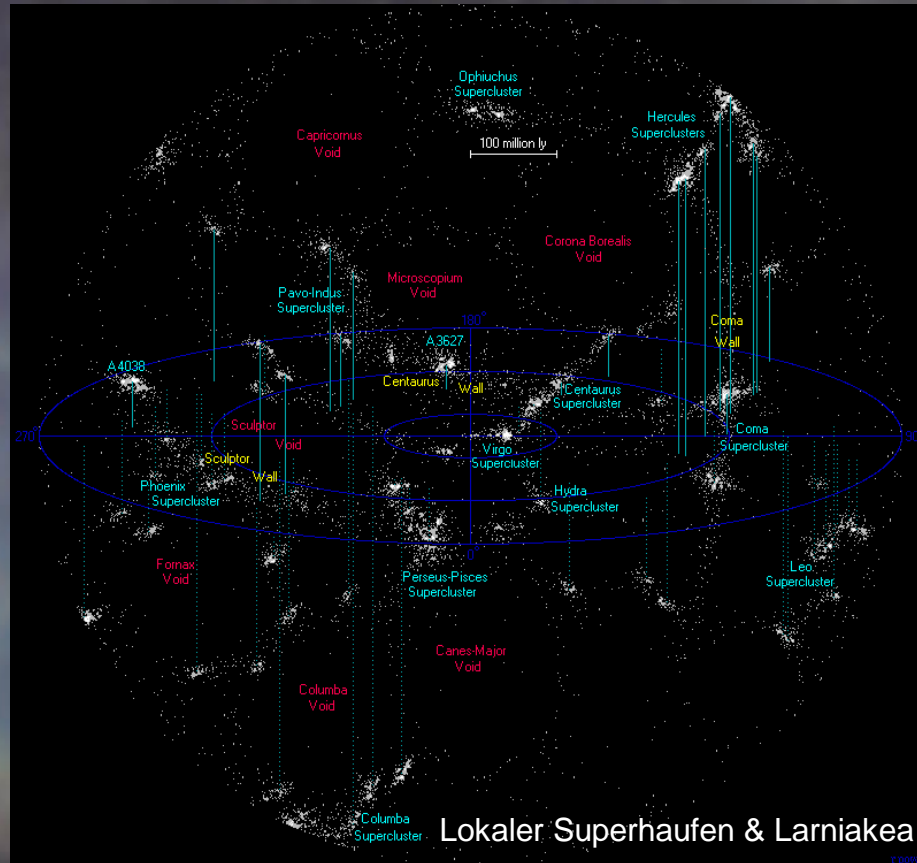


Typische Muster großräumiger Strukturen (BAO's)

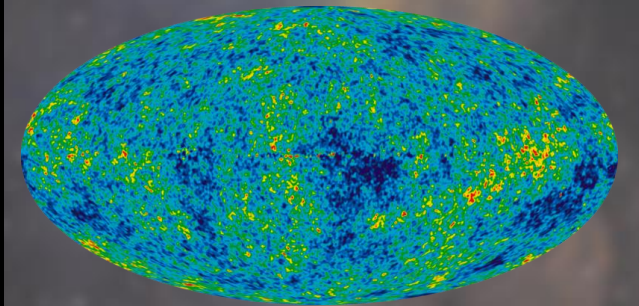


## Großräumige Strukturen im Universum

- Universum ist hierarchisch aufgebaut – von kleinen zu größeren Strukturen
  - Sterne – Galaxien – Galaxiengruppen – Galaxienhaufen – Superhaufen – Filamente
- Materie sammelte sich an den Grenzflächen (Filamente, Walls) der Voids (Blasen).
- Materiedichte aus normaler Materie kann Bewegung der Superhaufen entlang dieser Filamente nicht erklären.
- Dunkle Materie kann diese Beobachtungen erklären.
- Das kosmologische Standardmodell wird daher  $\Lambda$ -CDM-Modell genannt.
- $\Lambda$  (Lambda) bezeichnet die Dunkle Energie, die für die beschleunigte Expansion des Universums verantwortlich ist.
- Die größten Strukturen (Walls, Voids) werden als Schaumstruktur bezeichnet und sind Ausdruck minimaler Dichteschwankungen im frühen Universum.



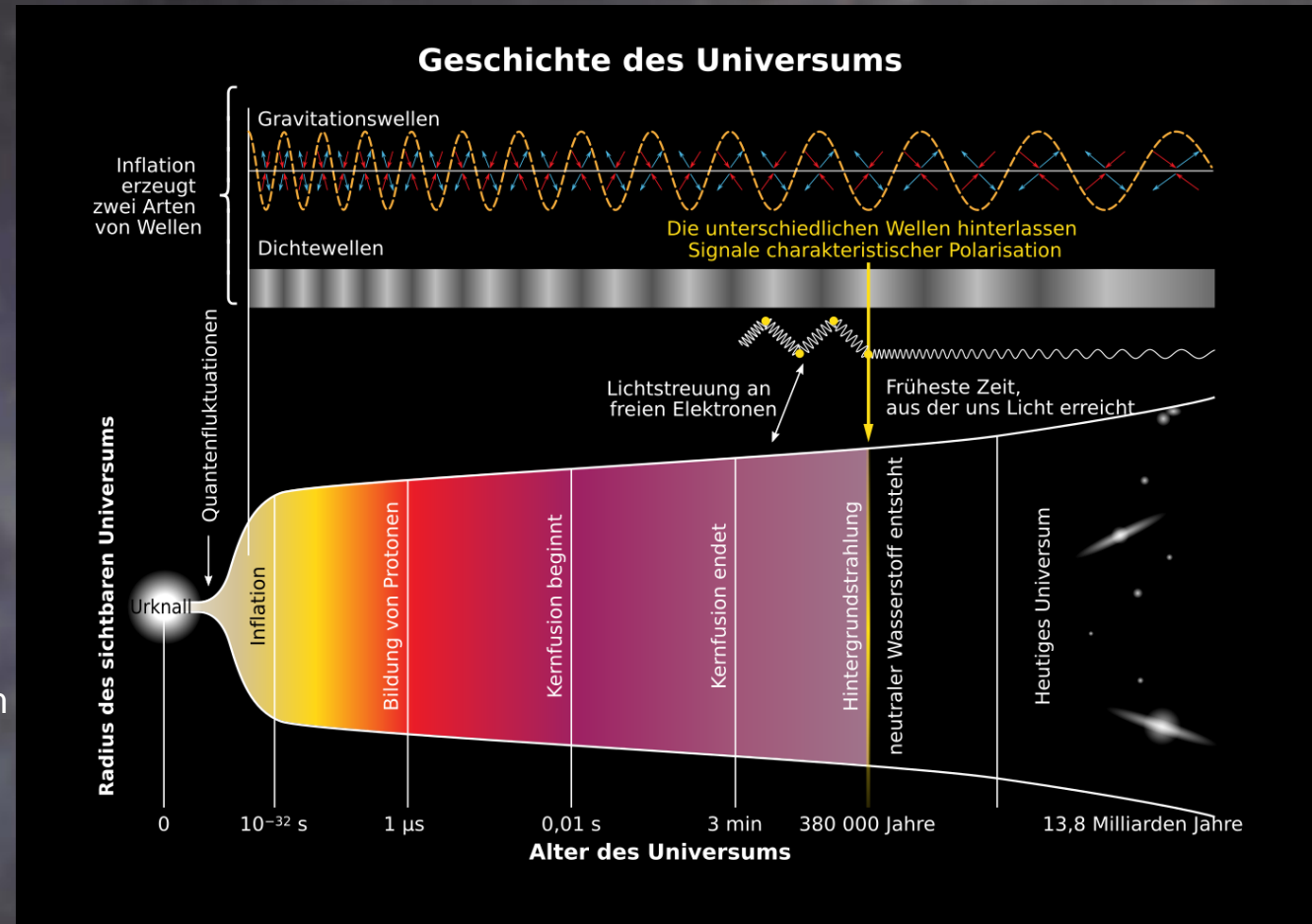
„Schaumstruktur“ des Kosmos



Kosmische Hintergrundstrahlung

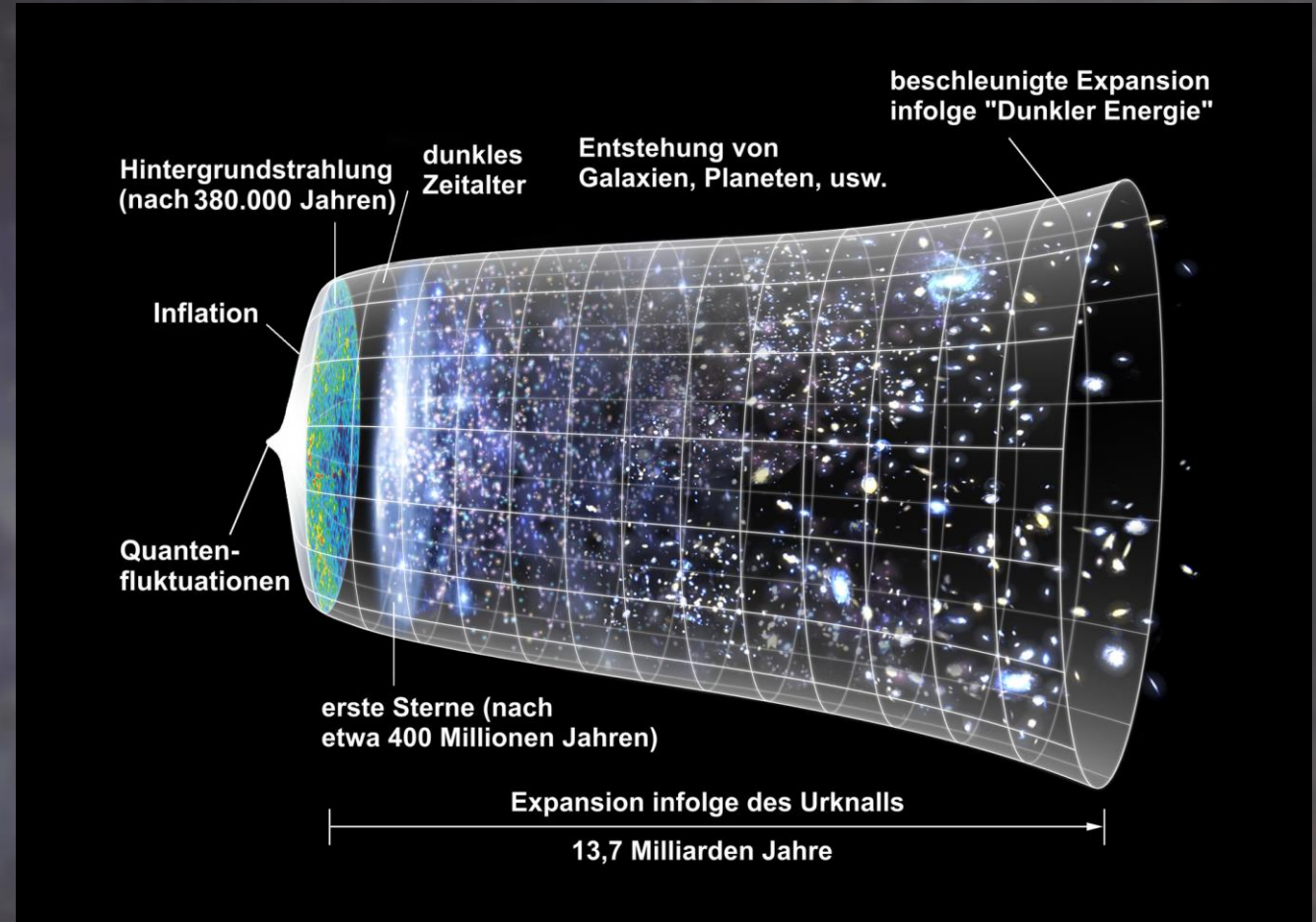
## Entwicklungsschritte ab dem Urknall

- Gängige Theorie: Big Bang fußt auf Allgemeiner Relativitätstheorie.
- Singularität lässt keine Rückschlüsse auf die Zeit davor zu.
- Heutiger Kenntnisstand noch sehr vage, versucht Quantenmechanik und RT in Einklang zu bringen.
- Erste Bruchteile von Sekunden (nach Planck- und GUT-Ära bis  $10^{-10}$  s) geprägt von:
  - Zerfall der Kräfte,
  - Spontane Entstehung und Annihilation von Elementarteilchen (Quantenfluktuation),
  - Dramatische Expansion (Inflation).
- Elementarteilchen vereinigten sich zu Protonen und Antiprotonen (Ungleichgewicht zu Gunsten der Protonen)
- Ab  $1/1000$  Sekunde füllten Protonen das Universum aus. Diese konnten zu Helium-Kernen fusionieren (Nukleosynthese).
- Nach 5 Min. Plasma aus freien Elektronen, H- und He-Kernen, Ende der Kernfusion.
- Nach 380.000 Jahren Bildung neutraler Atome  
Universum wird durchsichtig (Hintergrundstrahlung)



## Entwicklungsschritte ab dem Urknall

- Aufgrund winzigster Störungen der Symmetrie im frühen Universum Bildung von Materieansammlung unter dem Einfluss der Gravitation
- Entstehung erster Sterne (Sterne 1. Generation reichern Universum mit schweren Elementen an) und früher Formen von Galaxien nach etwa 1 Mrd. Jahre
- Häufige Verschmelzung von Protogalaxien zu größeren Galaxien, Bildung von Galaxienhaufen (Kondensationskerne aus Dunkler Materie?)
- Zwei Arten von Materie dominieren:
  - „Normale“ Materie (interagiert mit elektromagnetischer Strahlung)
  - „Dunkle“ Materie (macht sich nur über Gravitationswirkung bemerkbar)
- Bildung großräumiger Strukturen und Materieströmen
- Expansion des Universums beschleunigt sich ab dem Zeitpunkt, an dem die „Dunkle Energie“ über die Gravitation dominiert



# Galaxien – Entwicklung des Universums

## Offene Fragen

- Wie haben die ersten Galaxien ausgesehen, wie schnell haben sie sich gebildet, wie hoch waren Gasanteil und Sternentstehungsrate, wie und wann haben sie sich zu den heute bekannten großen Spiralgalaxien entwickelt?
- Was ist bzw. woraus besteht die „Dunkle“ Materie?
- Wo sind die stellaren Schwarzen Löcher der ersten Sterneneration?
- Wie schnell haben sich supermassive Schwarze Löcher gebildet ...

## und gegenwärtige Forschung

- JWST – Aufspüren frühester Galaxien
- eLIGO – Detektion von Gravitationswellen
- GUT – Grand Unified Theorie, Versuch alle Naturkräfte auf eine einzige Kraft zurückzuführen
- Computersimulationen um Modelle zu finden, die die heutigen Bedingungen im beobachtbaren Universum beschreiben

## Quellen

- Astronomie – Die kosmische Perspektive  
J. Bennett, M. Donahue, N. Schneider & M. Voit;  
2021 Pearson
- Wikipedia, world wide web
- Spektrum der Wissenschaft KOMPAKT, versch. Ausgaben  
(Galaxien, Urknall, Frühes Universum, Suche nach der  
Weltformel, Weltbild im Wandel)
- Sterne und Weltraum, Monatliche Ausgaben, Spektrum-Verlag

